

# LA PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA: CARACTERIZACIÓN E INFLUENCIA EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE UNA CUENCA DE MONTAÑA

Virginia CARRACEDO; Carolina GARMENDIA; Susana PACHECO y Domingo RASILLA  
*GIMENA (Grupo de Investigación del Medio Natural)*

*Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio; Universidad de Cantabria*

## RESUMEN

Este trabajo analiza el efecto del relieve sobre la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Pisuerga e indaga en su relación con la circulación atmosférica, resaltando los mecanismos dinámicos imperantes. Los resultados ponen de manifiesto que el efecto orográfico alcanza su máxima intensidad en invierno, y, en función de la trayectoria e intensidad de los flujos atlánticos, es posible distinguir un efecto de abrigo, cuando provienen del NW-N y otro de intensificación, cuando proceden del WSW. Finalmente, el último apartado establece el papel de la temperatura en la transformación de esa precipitación orográfica en diferentes patrones temporales de caudal.

**Palabras clave:** Cuenca del Pisuerga, efecto orográfico, anomalías de la circulación atmosférica.

## ABSTRACT

*Daily and monthly patterns of precipitation in the Pisuerga watershed (Northern Spain) are examined, in order to highlight the effect of the mountains on the spatial and temporal variability of precipitation, and to investigate its relationship with the regional-scale atmospheric circulation, emphasizing the underlying physical mechanisms of these relationships. Two different orographic effects have been highlighted: a stronger “rain-shadow effect”, when the incoming flow comes from the NW-N, and a less-intensity enhancement effect, if wet air masses are embedded into a WSW flow. Besides, the role of the temperature was discussed in order to characterize annual streamflow patterns.*

**Key words:** Pisuerga watershed, orographic effect, mid-tropospheric circulation anomalies.

## 1. INTRODUCCIÓN

El relieve ejerce un papel bien conocido sobre la distribución espacial de las precipitaciones, distorsionando o alterando los patrones existentes en las zonas circundantes. Este hecho convierte a las alineaciones montañosas en ámbitos sensiblemente más húmedos, aunque el incremento de las precipitaciones con la altura presenta diversa intensidad y considerable variabilidad temporal, en función de los mecanismos dinámicos característicos de cada ámbito (BARRY, 1992; JOHNSON y HANSON, 1995). Dichos mecanismos condicionan la naturaleza termodinámica de las masas de aire (temperatura, humedad, estabilidad), así como su frecuencia, al igual que la velocidad y dirección del viento que atraviesa esos relieves. A escala regional esta generalización merece matizaciones; por ejemplo, a una misma altitud la vertiente expuesta a los vientos dominantes (o de barlovento) recibe precipitaciones más elevadas (“efecto orográfico”) que la de sotavento, sometida, por el contrario, al efecto de “sombra pluviométrica” o “abrigo orográfico”.

En cualquier caso, este conjunto de fenómenos convierten a las montañas en “depósitos” naturales de agua, cuya correcta gestión debe tener en cuenta no sólo la cuantía del recurso y su distribución espacial y temporal, sino también su naturaleza (sólida o líquida). Este trabajo presenta los resultados preliminares de un estudio sobre la precipitación en la cuenca del río Pisuerga y su relación con los recursos hídricos del sector meridional de la Cordillera Cantábrica.

## 2. FUENTES Y METODOLOGÍA

La fuente básica de información es el valor mensual y diario de precipitación de un conjunto de observatorios pertenecientes a la red secundaria del INM, seleccionados atendiendo a criterios como la continuidad temporal de las observaciones (lagunas inferiores al 5% de la serie completa, rellenadas mediante regresión múltiple con las estaciones vecinas mejor correlacionadas), y representatividad espacial. La circulación atmosférica ha sido estudiada a través de la base de datos REANALYSIS (<http://www.cru.ua.ac.uk>), de la que se extrajeron parámetros como la humedad específica a 850 hPa y la presión a nivel del mar. A partir de los datos originales de esta última variable se calculó la varianza filtrada para resaltar la trayectoria más frecuente de las perturbaciones, así como unos tipos de circulación a escala diaria (FERNÁNDEZ GARCÍA *et al.*, 2002).

Los patrones espaciales de la precipitación a escala mensual se obtuvieron aplicando un Análisis en Componentes Principales sobre una matriz configurada en modo S (AGUADO *et al.*, 1993), utilizándose los valores originales en vez de sus anomalías, ya que el cálculo de este último estadístico refleja implícitamente el efecto orográfico. Para proporcionar un peso equitativo a las diferentes varianzas y amortiguar el sesgo de los valores mensuales, los componentes se extrajeron de una matriz de correlación basada en el coeficiente no paramétrico de Spearman. Dado que el propósito de este trabajo no es la delimitación de áreas uniformes, no ha sido necesaria la rotación de los componentes obtenidos (RICHMANN, 1985).

## 3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PRECIPITACIÓN

La cuenca del Pisuerga, uno de los principales tributarios de la margen derecha del Duero, cubre aproximadamente 14.526 km<sup>2</sup>. Su cota más alta se sitúa a 2.222 m, mientras que la más baja no supera los 690 m. Desde el punto de vista fisiográfico puede dividirse en cuatro ámbitos (Fig. 1):

1. La Montaña Palentina, al N, compuesta por un conjunto de valles en torno a los 1.000-1.200 m, flanqueados por alineaciones montañosas que superan los 1.600 m de altitud.
2. Las Loras, relieves amesetados con altitudes moderadas (en torno a 1.100-1.300 m) y valles a 900-1.000 m.
3. Los Páramos de Raña constituyen una rampa de moderada altitud (entre 1.000-1.200 m), ligeramente inclinada hacia el SE, disectada por cursos fluviales que circulan a unos 800-900 m.
4. Los Páramos y Campiñas de la mitad sudoriental, ya en la Meseta Septentrional, que no superan los 700-900 m.

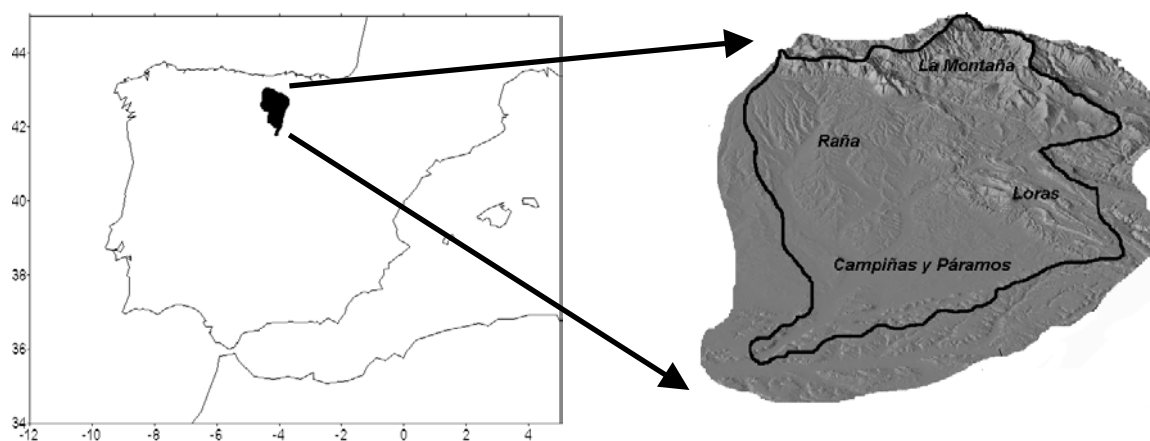


Fig. 1. Ámbitos fisiográficos en la cuenca del río Pisuerga

Las condiciones climáticas mediterráneas son moduladas por su localización interior, la altitud y la orografía. La distribución espacial de la precipitación coincide en gran medida con la topografía (Fig. 2a), no alcanzando los 500 mm en el tramo inferior, pero ascendiendo hasta 800 mm en Las Loras y rebasando los 1.000 mm en la Montaña Palentina.

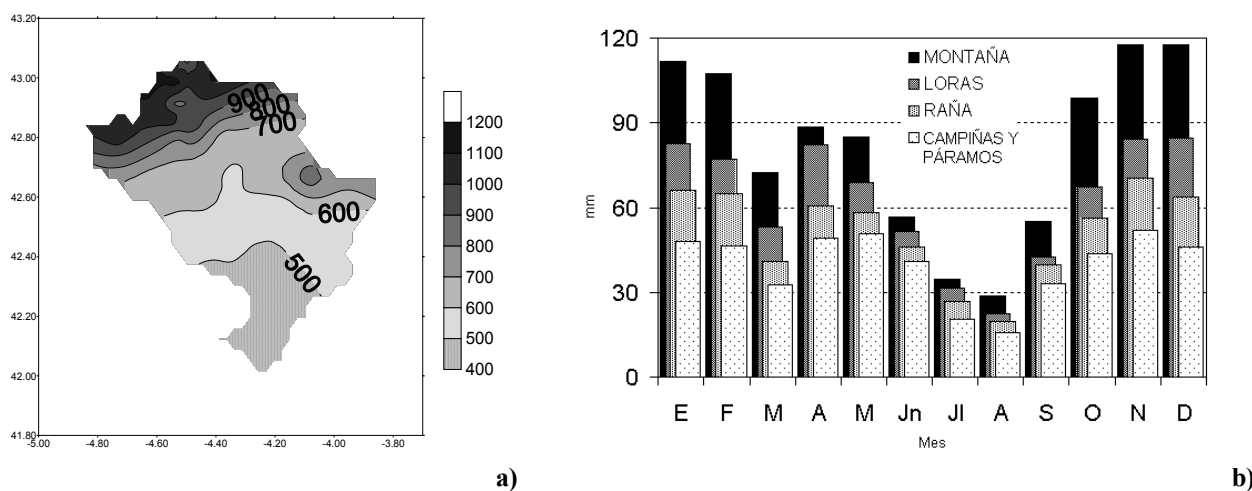


Fig. 2. Precipitación media anual en la cuenca del río Pisuerga (a) y ciclo estacional en cada región fisiográfica (b)

Estos valores están sometidos a un notable ciclo anual (Fig. 2b), siendo el verano la estación más seca (entre el 10 y el 20% del total anual) y el invierno la más húmeda. El máximo secundario es otoñal en la Montaña y la Raña, y primaveral en Las Loras y los Páramos y Campiñas (donde apenas se diferencia del invierno).

El análisis de la frecuencia de la precipitación apreciable según intervalos de intensidad proporciona los primeros indicios de los mecanismos que subyacen bajo esos atributos (Tabla 1).

Tabla 1. Número de días de precipitación, según categorías de intensidad

	TOTAL	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO
<b>DÍAS DE PRECIPITACIÓN</b>					
MONTAÑA	96,3	31,1	27,7	13,9	23,6
LORAS	90,9	29,0	26,8	13,0	22,1
RAÑA	73,2	23,1	21,2	11,0	17,9
PÁRAMOS	65,7	20,6	19,7	9,6	15,9
<b>DÍAS DE PRECIPITACIÓN &gt;10 mm</b>					
MONTAÑA	32,8	11,5	8,5	4,0	8,8
LORAS	24,5	8,0	6,6	3,7	6,2
RAÑA	20,4	6,5	5,2	3,3	5,4
PÁRAMOS	14,2	3,9	3,9	2,4	4,0
<b>DÍAS DE PRECIPITACIÓN &gt;30 mm</b>					
MONTAÑA	5,8	2,3	1,0	0,5	2,0
LORAS	3,0	1,1	0,6	0,3	1,1
RAÑA	2,2	0,6	0,4	0,3	0,8
PÁRAMOS	1,1	0,2	0,2	0,3	0,4

Los contrastes se acentúan en los intervalos con precipitaciones más intensas, particularmente relevantes en invierno, cuando la frecuencia de días incluidos en la categoría máxima es aproximadamente 11 veces mayor que en los Páramos.

Si se compara la frecuencia de días de precipitación por tipos sinópticos en una serie de observatorios representativos de cada comarca se perciben igualmente contrastes en su grado de actividad (Tabla 2). En este sentido, pueden identificarse un primer conjunto generador de precipitaciones abundantes y generalizadas (SW, W y C); un segundo grupo integrado por situaciones causantes de precipitaciones menos frecuentes y con un acusado gradiente N-S (NNE, NNW), y en tercer lugar, los tipos de circulación “secos” (A y E).

Tabla 2. Frecuencia de días con precipitación (%), según tipo sinóptico

OBSERVATORIOS	A	C	E	NNE	NNW	SE	SW	W	U
S. María Redondo	18,8	53,9	8,2	40,8	64,3	16,0	78,5	77,3	26,5
Báscones de Ojeda	12,4	52,0	6,4	17,1	43,9	18,6	73,5	76,9	23,2
Humada	11,8	56,6	11,3	29,3	44,6	12,2	67,1	70,7	21,9
Monzón	8,5	47,8	5,1	12,5	34,8	13,1	61,6	65,7	18,2

El análisis de la intensidad de la precipitación (Tabla 3) confirma y ratifica que los mayores contrastes espaciales aparecen de nuevo en los tipos NNE y NNW, aunque los tipos del SW y W también muestran un llamativo incremento de la intensidad en la montaña, mientras que el tipo ciclónico vuelve a presentar una distribución espacial homogénea con respecto a las restantes situaciones perturbadas.

Tabla 3. Intensidad diaria de la precipitación (mm/día), según tipo sinóptico

OBSERVATORIOS	A	C	E	NNE	NNW	SE	SW	W	U
S. María Redondo	0,79	3,38	0,30	1,94	4,56	0,64	7,96	5,64	0,99
Báscones de Ojeda	0,35	3,02	0,21	0,52	1,24	0,58	5,01	4,23	0,72
Humada	0,51	3,80	0,45	1,43	2,35	0,57	5,88	4,42	0,73
Monzón de Campos	0,20	2,88	0,24	0,36	1,15	0,43	3,13	2,78	0,72

Puede concluirse, por lo tanto, que el aumento de la precipitación en el reborde montañoso no responde tanto a una mayor frecuencia de eventos como a una intensificación de los mismos, particularmente en invierno (DEF), afectando esencialmente a circulaciones perturbadas de carácter advectivo. Al confirmarse que el invierno es el periodo de mayor relevancia de los contrastes pluviométricos entre los diferentes sectores fisiográficos, fue elegido para los siguientes análisis.

#### 4. PATRONES ESPACIALES DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL PISUERGA

Aunque la incorporación de un mayor número de observatorios con datos diarios no cabe duda que enriquecería la precisión de las afirmaciones anteriores, también es posible evaluar las diferencias espaciales con datos mensuales de precipitación, con la ventaja adicional de mitigar el “ruido” característico de los eventos diarios.

La aplicación de un análisis en componentes principales permite evaluar la intensidad y variabilidad espacial de los mecanismos de precipitación, a través de la representación cartográfica de la matriz de ponderaciones (*loadings*), que informa sobre la relación entre cada variable original (observatorio) y cada componente, y de la cuantificación de su intensidad temporal a través de la matriz de amplitudes (*scores*).

Dos componentes, acumulando el 88% de la varianza inicial, fueron seleccionados como los más representativos (Fig. 3). La alta varianza explicada por el primero (casi el 81%) y su homogeneidad espacial demuestran que es el mecanismo fundamental de la precipitación: valores positivos reflejan meses lluviosos mientras meses secos corresponden a valores negativos. El segundo, aunque sólo acumula el 7%, muestra una estructura dipolar, con ponderaciones positivas al N, en la montaña, y negativas al S, en la llanura, por lo que podría interpretarse como consecuencia de un efecto orográfico.

Esta explicación merece, sin embargo, matizaciones, ya que, en realidad, los meses con puntuaciones positivas corresponden a grandes diferencias de pluviosidad entre los observatorios de montaña y llanura, mientras que en los meses con valores negativos el efecto orográfico se mantiene, aunque atenuado. Además, la correlación de las ponderaciones con la altitud (0,85) es ligeramente inferior a la existente con la latitud (0,96), mientras que el trazado de la isolínea 0 no es estrictamente zonal: hacia el NW se mantiene paralelo a las últimas estribaciones montañosas (Sierra del Brezo), mientras que avanza hacia el S en el sector de Las Loras, pese a una menor altitud.

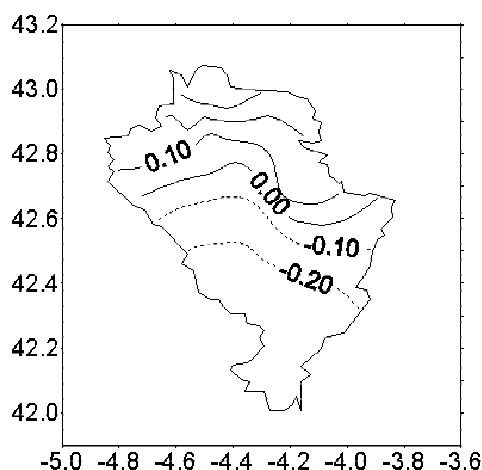


Fig. 3. Configuración espacial del 2º componente de la precipitación invernal en la cuenca del Pisuerga

## 5. RELACIONES ENTRE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA

El mecanismo fundamental que explica la cuantía de la precipitación invernal en la cuenca del Pisuerga es la frecuencia y actividad de las perturbaciones atlánticas. La correlación entre el 1º componente de la precipitación y la varianza de la presión a nivel del mar (Fig. 4a) manifiesta con claridad que los meses con abundantes precipitaciones coinciden con una reseñable actividad ciclónica al W de la Península Ibérica, vinculada a la llegada de un mayor número de perturbaciones (y no exclusivamente a una intensificación de las mismas, como muestran las correlaciones negativas al N de Europa).

Complementario a la ascendencia dinámica resultado de la convergencia de masas de aire en el seno de las perturbaciones ciclónicas, la elevada cuantía de la precipitación diaria en los tipos de circulación del W y SW es consecuencia de una advección de aire húmedo atlántico que alcanza la Península Ibérica por el flanco SE de las perturbaciones que circulan al NW de Galicia o sobre las Islas Británicas (Fig. 4b).

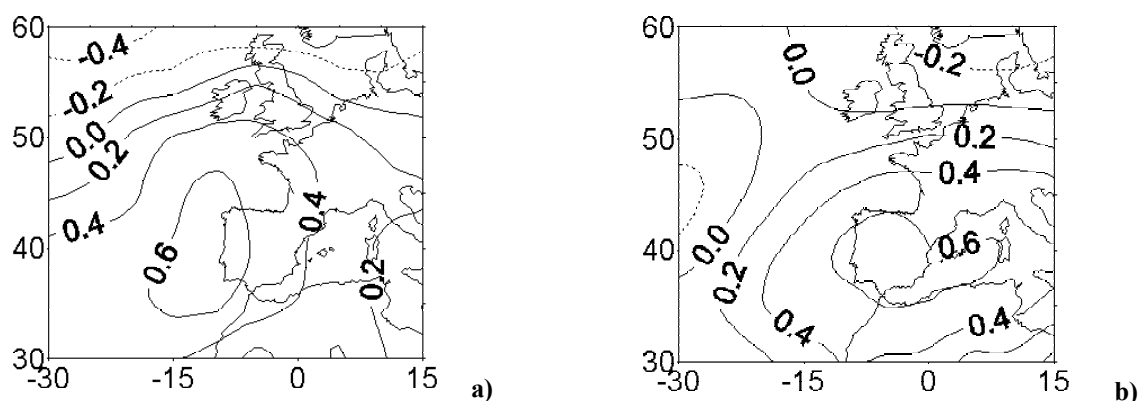


Fig. 4. Coeficientes de correlación entre el 1er componente principal de la precipitación en la cuenca del Pisuerga y la varianza de la presión a nivel del mar (a) y la humedad específica a 850 hPa (b) durante el periodo DEF (correlaciones superiores/inferiores a 0,3 son significativas con un nivel de confianza del 95%)

Para determinar la dinámica atmosférica correspondiente a cada uno de los patrones de precipitación, las ponderaciones de ambos componentes se dividieron en terciles (alto, medio o bajo), calculándose para cada categoría el mapa de anomalías de la topografía a 700 hPa (tan sólo se mostrarán las configuraciones asociadas a las categorías extremas).

En los meses con escasas precipitaciones y sin efecto orográfico (Fig. 5a) la circulación dominante es claramente anticiclónica; los núcleos de altas presiones, situados sobre Europa Occidental, impiden a las depresiones atlánticas aproximarse a la Península Ibérica. También durante los meses con precipitaciones bajas pero con un alto efecto orográfico la circulación resultante es anticiclónica, pero la localización de los centros de altas presiones se sitúa al NW de la Península Ibérica. Esta disposición impide la llegada de las perturbaciones frontales, pero favorece advecciones procedentes del Atlántico N, emplazándose gran parte de la cuenca del Pisuerga a sotavento; el relieve, por lo tanto, ejerce un efecto inhibitor de la precipitación.

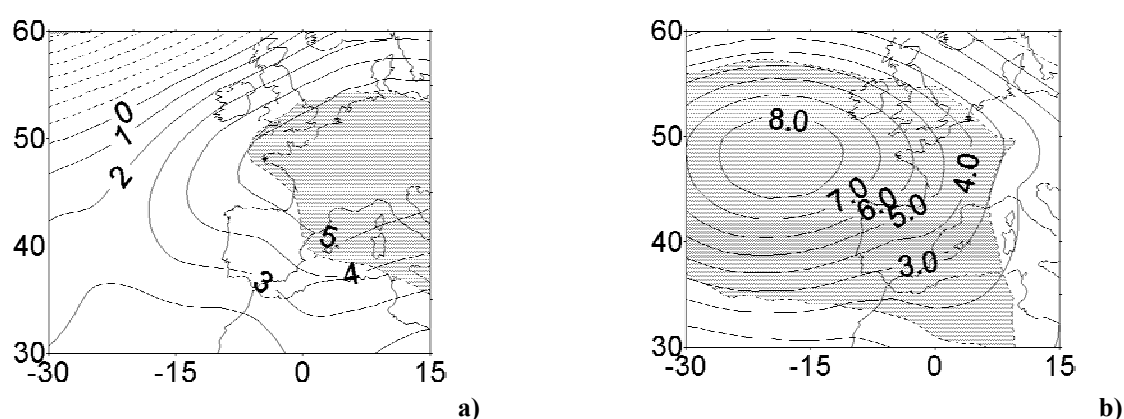


Fig. 5. Anomalías de la presión a nivel del mar durante los meses con precipitaciones escasas y efecto orográfico reducido (a) e importante (b).

En sombreado, valores significativos con un nivel de probabilidad de 0,05 según el test de Student

En párrafos anteriores se ha señalado que los meses invernales con precipitaciones abundantes responden a una intensificación de la circulación ciclónica. La ubicación concreta del área anómala de bajas presiones se sitúa al W de la Península Ibérica en el caso de un efecto orográfico reducido, y hacia el NW en el caso de los meses con efecto importante (aunque esta categoría incluye únicamente 2 casos). La causa de estas diferencias radica en la estructura y trayectoria de las perturbaciones; en el primer caso adoptan una trayectoria zonal, por lo que abundan los días ciclónicos, con sectores cálidos de dimensiones reducidas y sistemas frontales que reducen los contrastes espaciales al desencadenar precipitaciones sobre las comarcas llanas (Fig. 6a).

La intensificación orográfica necesita masas de aire húmedas y ligeramente inestables, arrastradas por vientos fuertes y perpendiculares a la cadena montañosa, y actividad frontal reducida. Estas condiciones activan los mecanismos de siembra (*“seeder-feeder”*) mediante el que la nubosidad alta y media (*“seeder clouds”*) siembra con las capas subyacentes, lo que favorece el crecimiento de las nubes bajas (*“feeder clouds”*) y el desencadenamiento de precipitaciones. Los sectores cálidos de las depresiones de latitudes medias son los que cumplen estos requisitos, particularmente en los meses

invernales. La explicación a la escasez de meses lluviosos con efecto orográfico intenso en la cuenca del Pisuerga es la ausencia de circulaciones persistentes del SW, ya que los flujos perturbados habituales suelen adoptar una dirección promedio del W (Fig. 6b).

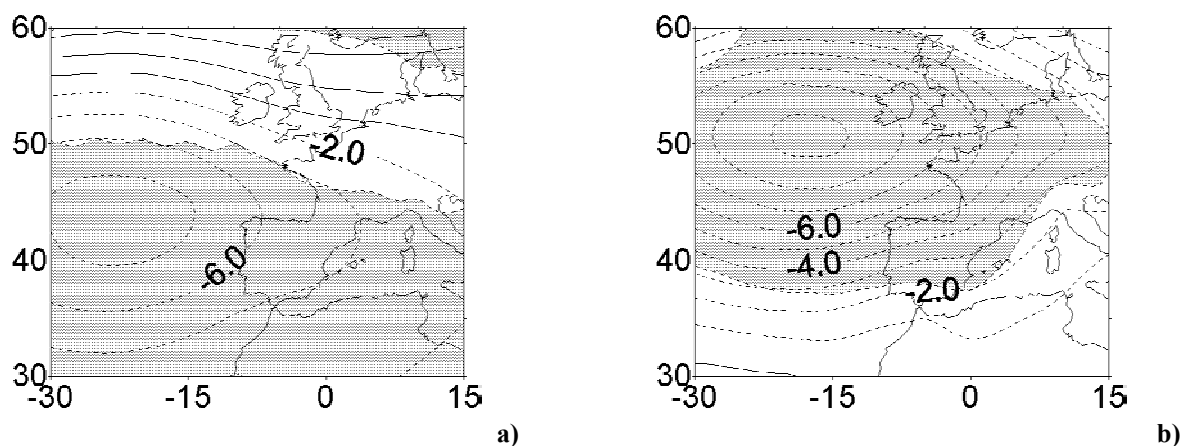


Fig. 6. Anomalías de la presión a nivel del mar (hPa) durante los meses con precipitaciones abundantes y efecto orográfico reducido (a) e importante (b).

En sombreado, valores significativos con un nivel de probabilidad de 0,05 según el test de Student

## 6. LA INFLUENCIA DE LA RETENCIÓN NIVAL EN LOS CAUDALES

Independientemente de su caracterización dinámica, el origen y trayectoria de las masas húmedas que desencadenan las precipitaciones en las montañas palentinas posee otra relevancia adicional, ya que existe una clara relación entre la ubicación de su región manantial y su rigor térmico, y este último controla el carácter líquido o sólido de la precipitación. Las condiciones fisiográficas de la cuenca del Pisuerga, dada su moderada altitud, no favorecen una permanente cubierta nival, ya que está sometida a una continua alternancia de acumulación y fusión del manto. Ejemplos excelentes de esta dinámica son dos años hidrológicos diferentes en función de las temperaturas, las precipitaciones y el caudal del Pisuerga.

El invierno de 1985 a 1986 estuvo caracterizado por temperaturas invernales relativamente bajas y persistentes, con medias diarias inferiores a los 5°C en no menos de 25 días; por su parte, las precipitaciones, sin ser excepcionalmente abundantes, permiten considerar ese invierno como húmedo. Ambos rasgos derivan de una circulación atmosférica caracterizada por situaciones del W, NNW y NE, generando estas últimas tres episodios fríos (mediados de diciembre, comienzos de febrero y de abril) con abundantes nevadas. A falta de más información, esa combinación de factores permitió el sostenimiento de un manto nival relativamente abundante y continuo, con un periodo de formación desde finales de noviembre hasta finales de febrero, y una fusión, comenzada a mediados de marzo, que mantuvo altos los caudales, aunque sin grandes puntas, hasta mayo.



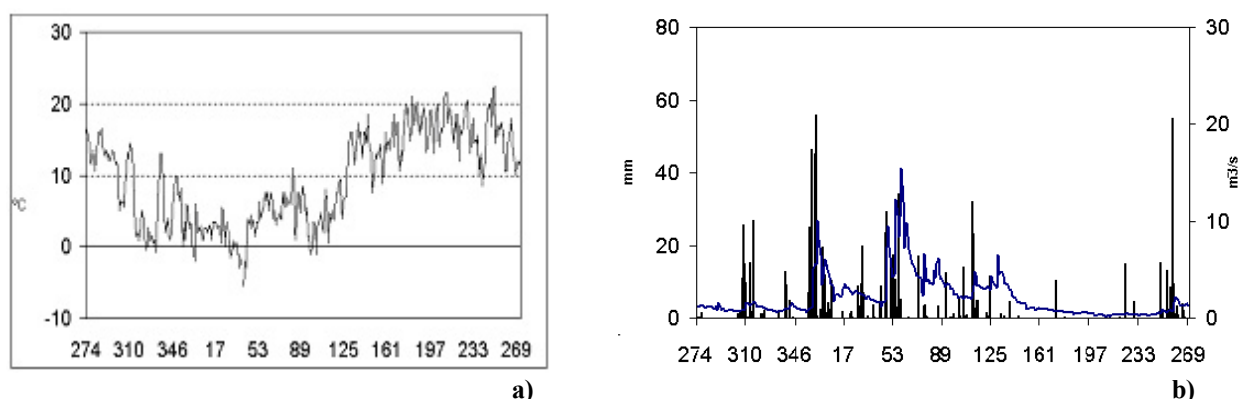


Fig. 7. Temperatura media (a), precipitación y caudales (b) en Cervera de Pisuerga y Embalse de Requejada durante el año hidrológico 1985-1986

El año hidrológico 1987-1988 presenta rasgos diferentes, con una sucesión de episodios pluviométricos relevantes ya en otoño, pero con ausencia de nevadas, salvo sendos episodios a fines de noviembre (cuya fusión inmediata generó una punta de caudales entre el 5 y el 8 de diciembre) y a fines de febrero. El dominio de una circulación del W, C y del SW, dirigiendo advecciones atlánticas, fue la causa de las abundantes precipitaciones y las temperaturas relativamente suaves, que impidieron persistencia del manto nival. Por el contrario, se aprecia una considerable variabilidad de los caudales, con máximos puntuales bien definidos, muy cercanos en el tiempo a los episodios de precipitación.

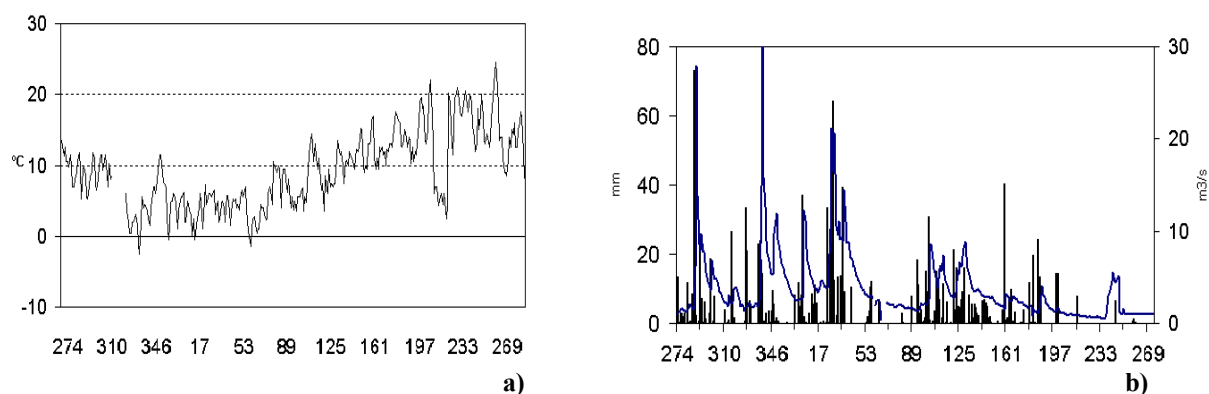


Fig. 8. Temperatura media (a), precipitación y caudales (b) en Cervera de Pisuerga y Embalse de Requejada durante el año hidrológico 1987-1988

## 7. CONCLUSIONES

La precipitación en la cuenca del Pisuerga combina una componente dinámica, independiente de la topografía, y otra orográfica, si bien ésta última corresponde más con una intensificación de la precipitación que con un aumento de la frecuencia de eventos de precipitación. La primera resulta de la convergencia de las masas de aire hacia el núcleo de una depresión, así como de la inestabilidad

desencadenada por los sistemas frontales, y se plasma en una distribución espacial relativamente uniforme.

La componente orográfica es en realidad resultado de dos procesos diferentes. El primero de ellos, resultado de la llegada de vientos húmedos perpendiculares a las principales alineaciones montañosas, intensifica las precipitaciones respecto a las zonas circundantes, siendo por ello relativamente moderado en la Cuenca del Pisuerga, ya que la configuración promedio de la circulación invernal rara vez favorece una persistencia de tales situaciones. El segundo, más intenso, acontece con flujos de componente septentrional, que al precipitar sobre las montañas del N, llegan desecados a las zonas llanas.

Junto a la cuantía de las precipitaciones, en la disponibilidad de caudales también influyen las temperaturas, de tal manera que en los inviernos relativamente templados y húmedos la cubierta nival ni es continua ni persistente, al contrario que en invierno fríos, favoreciendo estos últimos una fusión tardía de dicha cubierta.

## 8. REFERENCIAS

- AGUADO, E.; *et al.* (1993). Patterns of orographic uplift in the Sierra Nevada and their relationship to upper-level atmospheric circulation. En: *Proceedings of the 9th PACLIM Workshop*, pp. 153-163.
- AGUADO, E. (1990). "Elevational and latitudinal patterns of snow accumulation departures from normal in the Sierra Nevada". *Theor. Appl. Climatol.*, 42, pp. 177-185.
- BARRY, R.G. (1992). *Mountain Weather and Climate*. Methuen, London, 325 pp.
- FERNANDEZ GARCIA, F.; RASILLA ALVAREZ, D. and HORCAS, R. (2002). Secular variations of the synoptic scale atmospheric circulation over the Iberian Peninsula. En: BRUNET INDIA, M. and LÓPEZ BONILLO, (Eds). *Detecting and Modelling Regional Climate Change*. Springer-Verlag, pp. 229-238
- JOHNSON, G.L. and HANSON, C. (1995). "Topographic and atmospheric influences on precipitation variability over a mountainous watershed". *J. Appl. Meteor.*, 34, pp. 68-87.
- RICHTMAN, M.B. (1985). "Rotation of principal components". *J. Climatol*, 6, pp. 293-335.